

Quels « besoins » du poulet de chair en acides aminés essentiels ? Une analyse cri- tique de leur détermination et de quelques outils pratiques de modélisation

Il n'y a pas « un » besoin en acide aminé mais plutôt un ensemble de recommandations qu'il faudrait pouvoir adapter à des objectifs pratiques : profit économique, qualité, etc. Les tables nutritionnelles qui permettent de constituer les matrices de formulation des aliments par programmation linéaire sont peu adaptées à la diversité des situations d'élevage. Les expérimentations sont un outil lourd, peu précis et de portée limitée. Pour simuler des situations complexes, les modèles

mathématiques pourraient aider les professionnels à raisonner les apports en acides aminés dans des situations d'interactions entre plusieurs facteurs de variation de la performance : génotype, environnement, nutrition...

Résumé

Pour équilibrer les acides aminés essentiels d'un régime, le nutritionniste dispose de tables de recommandations moyennes issues de méta-analyses bibliographiques. L'estimation du besoin en un acide aminé essentiel dépend du critère de production que l'on cherche à optimiser et de la méthodologie adoptée pour analyser les résultats expérimentaux. Les conditions d'élevage et les types d'animaux étudiés expliquent une autre part de la variabilité des recommandations. Les moyennes issues des méta-analyses de données bibliographiques sont finalement assez peu précises et d'autant plus difficiles à adapter aux conditions pratiques qu'elles concernent essentiellement les poulets de chair à croissance rapide dans des conditions optimales. L'intégration des bases du métabolisme énergétique et protéique à l'aide de modèles mécanistes peut constituer un moyen complémentaire de quantifier les effets d'une recommandation en acide aminé essentiel dans des conditions variables. La modélisation permet non seulement la synthèse des connaissances acquises par l'expérimentation, mais également la prise en compte des interactions multiples entre plusieurs facteurs de variation. Dans la pratique, les modèles commercialisés permettent de mesurer les effets des principales caractéristiques de l'aliment et des conditions d'élevage sur la croissance ou les besoins en acides aminés des poulets de chair. Leurs résultats semblent suffisamment précis pour une utilisation pratique, mais leur présentation de type « boîte noire » et la complexité de leur fonctionnement sont un frein à leur mise à jour ou à leur adaptation à de nouveaux modes de production. Le modèle INAVI, présente une structure plus ouverte à l'utilisateur qui permet une meilleure adaptation aux diverses situations d'élevage. INAVI prédit la croissance des animaux en se basant sur l'effet des conditions d'élevage et d'alimentation sur l'ajustement de l'ingestion.

Pour l'archéoptéryx, ancêtre préhistorique de nos poulets, la recherche d'un apport protéique suffisant et équilibré en protéine était probablement déjà un problème quotidien... Les poulets de chair sont aujourd'hui sans doute moins préoccupés par cette question, mais les nutritionnistes se la posent encore chaque jour. La nutrition azotée est d'ailleurs encore un thème de recherche après 50 ans de travaux actifs. En 2002, dans la section « nutrition et métabolisme » de la revue Poultry Science, l'un des principaux journaux internationaux traitant de recherches avicoles, l'alimentation protéique représente encore plus de 20 % des publications. La pré-

occupation des nutritionnistes est avant tout d'origine économique. L'équilibre protéique de l'aliment coûte cher et est l'un des principaux déterminants du résultat technique. Une formule alimentaire mal ajustée peut annuler

la marge bénéficiaire de la production de poulets. Il est nécessaire d'optimiser les teneurs de l'aliment en chacun des acides aminés essentiels (AAE) et en l'ensemble des acides aminés non essentiels (cf. encadré).

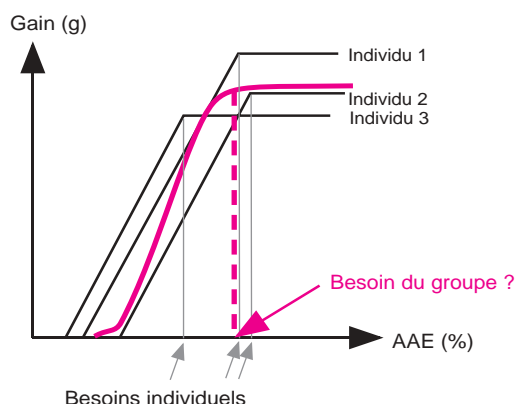
Rappels sur les besoins en acides aminés essentiels

Il existe deux grands types d'acides aminés (AA) : les « essentiels » (AAE), c'est-à-dire ceux que le métabolisme n'est pas (ou mal) capable de synthétiser et les acides aminés non essentiels (AANE). Chez le poulet, méthionine, lysine, thréonine, tryptophane, leucine, isoleucine, valine, serine, arginine, histidine et phénylalanine sont essentiels.

« Réponse » à un AAE

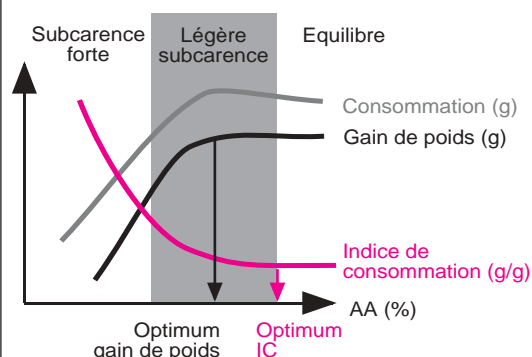
Les besoins sont estimés par la « réponse » zootechnique d'un groupe d'animaux à une dose croissante d'un AAE dans un aliment sub-carencé en cet AAE seulement. L'optimum (le besoin), est défini par la teneur alimentaire minimale en un AAE suffisante pour induire la réponse maximale (Fisher *et al* 1973). Du fait, entre autres, des variations individuelles, la réponse est curvilinéaire ce qui rend plus délicate la détermination précise d'un besoin.

Notion de variabilité inter-individuelle dans la détermination du besoin



La zone qui préoccupe le plus le praticien est la zone de subcarence légère car, pour plusieurs AAE (lysine, méthionine), les poulets surconsument un aliment légèrement sub-carencé. Ceci conduit à un besoin supérieur pour optimiser l'indice de consommation (IC) à celui pour optimiser le gain de poids (GP).

Réponse à une dose croissante d'un acide aminé dans un régime



D'autres paramètres comme le rendement en filet ou l'engraissement peuvent être considérés pour l'optimisation.

Du besoin le plus faible (1) au plus élevé (3) selon le critère.

Référence	AAE	GP	IC	Filet
Labadan <i>et al</i> 2001	Lysine	1	2	1
	Arginine	1	2	3
Mack <i>et al</i> 1999	Lysine	1	3	2
	Thréonine	1	3	2
Leclercq 1998	Lysine	1	3	2
	Thréonine	2	3	1

Le concept de protéine « idéale » est-il utile en pratique ?

L'intérêt principal de la « protéine idéale » est de simplifier l'expression des besoins. Cependant, l'équilibre optimum en AAE est toujours incertain et on ne peut pas trop réduire la teneur en protéine de l'aliment sans détériorer les performances du poulet (Holsheimer et Janssen 1991, Bregendahl *et al* 2002). L'intérêt économique de la protéine idéale chez le poulet est douteux ; il serait renforcé par une écotaxe sur les rejets azotés (Leclercq *et al* 1993).

Profil de protéines « idéales » pour le poulet de chair (% de la lysine)

	NRC 1994	Illinois ¹ 1995	Mack <i>et al</i> 1999	Roth <i>et al</i> 2001
Lysine	100	100	100	100
AA Soufrés	82	72	75	70
Thréonine	73	67	63	66
Tryptophane	18	16	19	14
Isoleucine	73	67	71	63
Valine	82	77	81	81
Arginine	114	105	112	108

¹ voir Baker et Han (1994).

Réactualisation nécessaire

Les tables de recommandations en AAE sont anciennes et les teneurs préconisées sont relativement faibles pour les génotypes actuels (Kerr *et al* 1999a et b, Si *et al* 2001). Le coût des protéines dans l'aliment justifie une réactualisation des recommandations. Celles-ci doivent être adaptées aux caractéristiques du régime (forme de présentation) et de l'environnement (température, rythme lumineux, densité animale etc.) et à la diversité des modes de production (ex. poulets label).

Depuis 40 ans, de nombreuses études ont été menées pour déterminer les besoins en AAE des poulets de chair. Elles ont conduit à l'établissement de tables nutritionnelles censées représenter la quantité moyenne minimale d'AAE nécessaire pour maximiser un paramètre zootechnique ou minimiser l'indice de consommation (INRA 1984, RPAN 1993, NRC 1994...). Mais le paramètre à optimiser évolue dans le temps. Dans les années 60, la vitesse de croissance était l'objectif de production principal, remplacé dans les années 70 et 80 par l'indice de consommation et le coût alimentaire. Aujourd'hui, ce sont les rendements en filets qui doivent être maximisés dans une optique de transformation des carcasses (Pesti et Miller 1997). Et demain ? la qualité des muscles, leur aptitude à la transformation ? Il n'existe donc pas « un » besoin mais un ensemble de recommandations correspondant à « des » situations diverses et évolutives.

Les modèles dits mécanistes intègrent un ensemble de facteurs influençant les performances d'un animal et mesurent leurs effets simultanés sur la consommation alimentaire et la croissance donc sur les besoins (Zoons *et al* 1991). Ils permettent de prendre en compte une partie de la complexité d'un élevage et de son environnement au sens large (contextes d'élevage, économiques, politiques, etc.). Depuis le début des années 80 et le développement des outils informatiques, plusieurs modèles de prédiction de la croissance ou des besoins (essentiellement en acides aminés et en énergie) ont été développés et le plus souvent commercialisés, mais leur diffusion sur le terrain est difficile à évaluer. Les résultats des expérimentations classiques restent donc les données les plus accessibles à un professionnel qui veut actualiser ses données de formulation.

La première partie de cet article analyse les conséquences des variations méthodologiques, génétiques ou environnementales sur la détermination du besoin en AAE du poulet de chair. La deuxième partie décrit les outils de modélisation des besoins en AAE afin d'introduire la notion de modèle mécaniste et son intérêt dans une gestion plus dynamique de l'alimentation dans un système élevage. Enfin, l'efficacité de quelques outils pratiques permettant d'adapter les recommandations en AAE est discutée. Un outil de simulation de la croissance, INAVI, est présenté.

1 / Sources de variation des recommandations en AAE chez le poulet

Les recommandations d'apport en AAE établies par l'INRA (1984), RPAN (1993) et le NRC (1994) sont issues de méta-analyses bibliographiques. Par exemple, les besoins en lysine du poulet établis par le NRC sont issus de 21 références bibliographiques datant de 1942 à 1981, ceux de la méthionine + cystine de 28 références, mais tous les AAE ne sont pas autant étudiés : la recommandation pour l'histidine ne provient que de 5 publications.

Une étude de publications récentes (1991-2001) sur le besoin en lysine du jeune poulet de chair entre 1 et 21 jours montre que son estimation peut varier sensiblement (tableau 1). Pour maximiser le gain de poids, le besoin en lysine digestible varie de 0,89 à 1,09 % selon les auteurs. Si l'on compare ces résultats à ceux publiés dans les tables, le besoin moyen obtenu à partir des expérimentations est proche de la valeur de RPAN (0,99 et 1,02 % pour le gain de poids et l'indice de consommation respectivement), mais plus

Les recommandations d'apport en acides aminés sont établies à partir de résultats d'essais. Elles varient selon les conditions expérimentales, les méthodes d'analyse et le critère à optimiser.

Tableau 1. Comparaison des recommandations d'apport en lysine au poulet de chair (âge < 21 jours) issues de synthèses bibliographiques (RPAN 1993, NRC 1994) et d'expérimentations zootechniques de caractéristiques diverses. Un coefficient de digestibilité de la lysine de 85,1% (RPAN Nutrition Guide) est utilisé pour convertir les données exprimées en lysine totale dans l'aliment.

Référence	Période (jours)	Caractéristique expérimentale	Recommandation (% lysine digestible / kg d'aliment) optimisée pour		Méthode statistique de détermination
			Gain de poids	IC	
Han et Baker 1991	8-21	Croissance lente	0,96	0,99	Linéaire-Plateau
Han et Baker 1991	8-21	Croissance rapide	0,93	0,99	Linéaire-Plateau
Han et Baker 1993	8-21	Mâles	1,00		Linéaire-Plateau
Han et Baker 1993	8-21	Femelles	0,93		Linéaire-Plateau
Han et Baker 1993	8-21	Chaleur	1,02		Linéaire-Plateau
Vasquez et Pesti 1997	1-21	Méta-analyse	0,89	0,94	Linéaire-Plateau
Vasquez et Pesti 1997	1-21	Méta-analyse	1,03	1,12	Polynôme
Knolwes et Southern 1998	4-15	Mâles	1,00	1,10	Linéaire-Plateau
Schutte et Smink 1998	1-15	Mâles	1,05		ANOVA
Kidd et Fancher 2001	1-18	Mâles	1,01	1,00	Polynôme
Labadan <i>et al</i> 2001	1-15	Mâles	1,09	1,03	Linéaire-Plateau
Recommandation moyenne (coeff. de variation)			0,99 (5,9 %)	1,02 (6,3 %)	
RPAN 1993	1-21	Synthèse	1		
NRC 1994	1-21	Synthèse	0,94		

élevé que celle donnée par le NRC (0,94 %). On remarque également que les résultats sont variables d'une expérience à l'autre (coefficient de variation de 6 %). Comment expliquer de telles différences entre des expériences qui utilisent des régimes de base de composition semblable pour un âge où les réponses des poulets à la supplémentation en AAE sont les plus nettes ? Une partie de la réponse se trouve dans le tableau 1 : la méthode et le type d'analyses statistiques utilisés et les conditions expérimentales (choix du génotype du poulet, température ambiante) sont susceptibles de modifier le besoin. En comprendre l'incidence respective permet de mieux gérer le risque d'imprécision lié à une recommandation d'apport en AAE, sans oublier le rôle essentiel de la composition du régime de base utilisé dans ces expériences.

1.1 / Les méthodes expérimentales employées

a / Composition des aliments expérimentaux

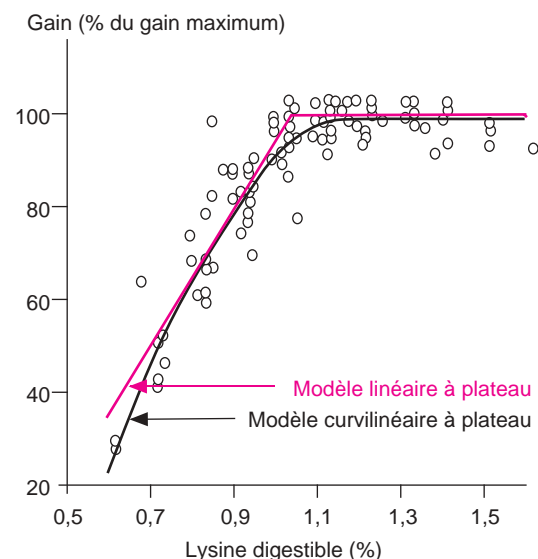
La détermination des besoins en AAE résulte le plus souvent de l'analyse des effets d'une dose croissante d'AAE sur un paramètre zootechnique. Deux méthodes sont utilisées : soit une supplémentation par un AA de synthèse d'un aliment mono-déficient, soit la dilution d'un aliment très riche en AA. La méthode de supplémentation engendre des déséquilibres entre l'AA testé et les autres, qui pourraient conduire à des effets négatifs sur la croissance (Gous et Morris 1985). De plus, le plateau de réponse observé peut correspondre à une limitation par un autre AAE et conduire à une sous-estimation du besoin. La comparaison intra-essai des performances obtenues avec un aliment témoin équilibré de type commercial peut lever ces incertitudes (D'Mello 2003). La méthode de dilution, initialement développée par Fischer et Morris (1973) pour étudier la réponse des poules pondeuses à l'ingestion de méthionine, est basée sur la dilution d'un aliment riche et équilibré en AAE avec un aliment isoénergétique sans protéine ou équilibré de la même façon que l'aliment de base, mais avec une teneur faible en l'AA à étudier. Cette méthode a l'avantage de conserver les équilibres entre AA. Cependant, l'obligation d'avoir un régime de base à teneur élevée en AA ne le protège pas des phénomènes de déséquilibre et peut notamment conduire à une surestimation du besoin en arginine avec un aliment de base très riche en lysine ou en valine, dans le cas d'un excès de leucine (D'Mello 2003). Un autre défaut de cette méthode est la réduction de la teneur en protéine du régime qui peut en elle-même affecter les performances lorsque l'aliment de dilution ne contient pas de protéines (Hurwitz *et al* 1998). Notons que même si les deux méthodes sont imparfaites sur le plan nutritionnel et donc potentiellement sources de variations, la méthode de supplémentation reste aujourd'hui la plus utilisée, car elle correspond mieux à la pratique courante de la supplémentation des aliments par les AAE les plus limitants sous une forme synthétique.

b / Analyse mathématique des résultats

Les méthodes mathématiques permettant d'estimer l'optimum de supplémentation en AA ont une incidence non négligeable sur le résultat (cf tableau 1). L'analyse de la variance suivie par un test de comparaison multiple des moyennes est une méthode encore employée (Schutte et Smink 1998). Son principal défaut est sa faible précision car, pour avoir 90 % de chance de détecter significativement une différence de 5 points d'indice de consommation (soit 0,05), il faudrait au minimum une vingtaine de répétitions (parquets de poulets) par niveau d'AAE (Pack 1997, Berndtson 1991). Avec 6 niveaux d'un AAE, les dispositifs expérimentaux deviennent rapidement irréalisables.

La méthode de choix pour l'étude des courbes dose/réponse est la régression. Elle requiert, d'une part, un modèle mathématique satisfaisant pour décrire la loi de réponse et, d'autre part, une méthode de recherche de l'optimum. Deux types de modèles principaux sont utilisés : le modèle linéaire à plateau et les modèles exponentiels ou curvilinéaires. Le modèle linéaire à plateau est la référence pour plusieurs auteurs (Labadan *et al* 2001, Baker *et al* 2002). Il décrit la réponse à la dose d'AA sous la forme d'une droite ascendante en situation de sub-carence puis d'un plateau quand le maximum est atteint (figure 1). Le nœud, c'est-à-dire l'intersection entre ces deux droites, est l'avantage principal de ce type de modèle car il est un point objectif définissant l'optimum. Toutefois, sur un plan biologique, deux types d'arguments vont à l'encontre d'une loi de réponse linéaire à plateau. D'une part, la variabilité inter-individuelle conduit à un lissage de la réponse, ce qui ne permet pas de valider la linéarité de celle-ci (cf. encadré). D'autre part, la plupart des activités enzymatiques et des réponses biologiques suivent des lois de réponse curvilinéaires. En biologie, la loi du « rendement décroissant », c'est-à-dire,

Figure 1. Utilisation des modèles linéaire et curvilinéaire à plateau pour l'estimation du besoin en lysine (d'après Vasquez et Pesti 1997).



dans le cas qui nous intéresse, de la baisse relative du « profit zootechnique » avec l'augmentation de la concentration d'AAE, est beaucoup plus appropriée à la description de la réponse effective des animaux (Pesti et Miller 1997) qui correspond plutôt aux modèles exponentiels développés plus loin. La zone de réponse qui intéresse le formulateur est la transition entre la subcarence légère et l'équilibre en AAE. Or les modèles linéaires à plateau ne sont pas de bons prédicteurs dans cette zone et, dans la majeure partie des cas, ils sous-estiment le besoin (Remmenga *et al* 1997, Vasquez et Pesti 1997). Pourtant, un travail récent de Lamberson et Firman (2002) tend à montrer, à partir de données simulées de croissance de dindons, que le modèle à double pente (modèle proche du linéaire à plateau sauf qu'il considère que le plateau est une deuxième droite qui n'est pas obligatoirement horizontale) est plus précis que le modèle exponentiel. Il faut toutefois noter que leur méthode utilisée pour générer les données de réponse à la teneur en AAE était basée sur l'hypothèse de double linéarité, ce qui n'était pas sans influence sur les conclusions de l'étude. En tout état de cause, un intérêt majeur de ce type de simulations est de montrer que la seule variabilité expérimentale sur les performances des animaux (et éventuellement sur les dosages d'acides aminés) est responsable d'une imprécision importante sur l'estimation du « besoin », quel que soit le modèle employé.

Les modèles exponentiels (ou curvilinéaires) sont mieux adaptés à une description biologique de la réponse animale, mais la détermination du point optimal de ces courbes reste empirique (Pack 1997, Mack *et al* 1999). La majeure partie des études situent les besoins à 90, 95 voire 99 % de l'asymptote

pour le gain de poids ou 110, 105 et 101 % pour l'indice de consommation. Cette méthode de calcul rend difficile la détermination d'un intervalle de confiance sur le besoin et, ce qui est le plus gênant, aucune loi ne régit vraiment le choix de ce coefficient. De plus, pour qu'un modèle exponentiel puisse être bien ajusté, il faut un minimum de points au-dessus du besoin, ce qui n'est pas toujours le cas. Une alternative intéressante est peut-être le modèle curvilinéaire à plateau, qui a le double avantage de considérer la curvilinearité de la réponse dans la zone de légère subcarence et un « nœud » comme le modèle linéaire plateau (Vasquez et Pesti 1997 ; figure 1).

1.2 / Le regroupement de données hétérogènes

Pour définir une recommandation et limiter les effets spécifiques liés à l'hétérogénéité des données expérimentales, la méthode actuelle repose sur la compilation des résultats d'un ensemble de publications : une méta-analyse bibliographique. Néanmoins, pour mesurer une recommandation à partir d'un grand ensemble de données, les méthodes d'analyse sont celles déjà décrites avec les mêmes défauts. Par exemple, une méta-analyse du besoin en lysine est réalisée à partir de 11 références récentes (1991 à 2002 ; tableau 2). L'ensemble des données a été indexé à la performance la plus élevée dans chacune des expériences afin d'éviter les différences liées aux génotypes ou aux conditions des expériences. Deux approches sont testées. La première consiste à appliquer trois modèles de détermination du besoin (linéaire-plateau, curvilinéaire et curvilinéaire à plateau) à chacune des études et à regrouper les résultats

Différents modèles sont utilisés pour décrire la loi de réponse à un apport d'acide aminé et déterminer son optimum. Leur précision n'est pas toujours satisfaisante.

Tableau 2. Etude du besoin en lysine digestible du poulet de chair pendant 3 périodes de sa croissance à partir de 11 références bibliographiques (19 expériences). Le besoin a été calculé pour optimiser l'indice de consommation (IC) selon une méthode individuelle regroupant la moyenne des besoins calculés pour chacune des expériences et une méthode globale qui considère l'ensemble des résultats (exprimé en % de l'IC minimal correspondant). Trois modèles mathématiques ont servi au calcul de l'optimum :

- le modèle exponentiel ($X+Y$: asymptote) : $IC = X+Y*(1-EXP(-Z*Lys\ dig))$
- les modèles linéaire et curvilinéaire à plateau (A : asymptote, B : coefficient) : $IC = A+B*(Besoin-\%Lys\ dig)$ si $(\%Lys\ dig < Besoin)$ et $A+B*(Besoin-\%Lys\ dig)^2$ si $(\%Lys\ dig > Besoin)$

Références : Grisoni *et al* 1991, Han et Baker 1991 et 1994, Knowles et Southern 1998, Leclercq 1998, Schutte et Smink 1998, Mack *et al* 1999, Kidd *et al* 2001, Labadan *et al* 2001, Baker *et al* 2002, Corzo *et al* 2002.

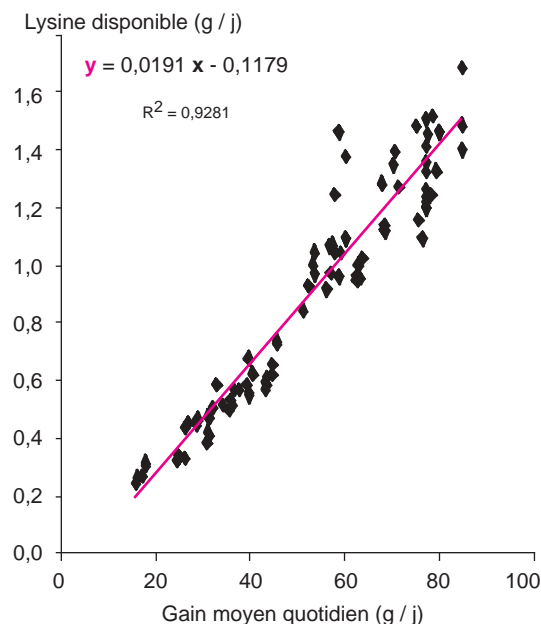
Période (nb exp)	Etude individuelle (g lysine digestible / 1000 kcal ± intervalle de confiance à 95 %)			Etude Globale (g lysine digestible / 1000 kcal ± intervalle de confiance à 95 %)		
	Exponentiel (101% Asymptote)	Curvilinéaire - plateau	Linéaire -plateau	Exponentiel (101 % Asymptote)	Curvilinéaire - plateau	Linéaire -plateau
0-10 jours (5)	3,823 ± 0,319	3,370 ± 0,258	3,109 ± 0,194	3,706 ± NC	3,386 ± 0,278	3,047 ± 0,133
11-30 jours (5)	3,660 ± 0,484	3,174 ± 0,186	2,823 ± 0,263	3,530 ± NC	2,815 ± 0,222	2,404 ± 0,114
31-50 jours (9)	3,257 ± 0,495	3,157 ± 0,137	2,798 ± 0,186	2,987 ± NC	2,782 ± 0,211	2,631 ± 0,138

NC : non calculé.

afin de définir un besoin moyen. La seconde est une approche globale où les modèles sont appliqués à l'ensemble des données (approche de Vasquez et Pesti 1997). Par la méthode d'analyse individuelle, les besoins estimés après 10 jours d'âge sont de 10 % supérieurs à ceux estimés par la méthode globale. En outre, la détermination est assez peu précise comme l'indiquent les intervalles de confiance. Quelle que soit la méthode d'analyse, le besoin estimé par le modèle curvilinéaire est 20 % plus élevé que celui estimé par le modèle linéaire à plateau. Le modèle linéaire à plateau peut également conduire à des aberrations comme l'illustre le besoin plus faible entre 11 et 30 jours d'âge, par rapport à celui lors de la période 31-50 jours calculé dans l'étude globale. Le modèle curvilinéaire donne des résultats intermédiaires entre le modèle exponentiel et le modèle linéaire à plateau avec des besoins calculés relativement proches des valeurs des tables de RPAN (1993) ou du NRC (1994). Néanmoins, les besoins calculés pour les périodes 11 à 30 jours et 31 à 50 jours sont 12 à 13 % plus élevés que les recommandations du NRC, ce qui suggère une probable augmentation des besoins des génotypes actuels. Ceci va dans le sens de nombreux travaux récents sur le besoin en lysine (Kerr *et al* 1999a et 1999b). Globalement, notre analyse confirme l'effet de la méthode d'interprétation des résultats sur une recommandation issue d'une synthèse bibliographique.

Une alternative à la démarche précédente a été présentée récemment par Geraert *et al* (2003). A partir d'une méta-analyse bibliographique, la relation entre gain de poids quotidien et lysine ingérée a servi de base à l'expression du besoin (figure 2). En effet, pour un objectif de croissance donné, la régression entre lysine ingérée et gain de

Figure 2. Relation entre vitesse de croissance (g/jour) et lysine ingérée disponible (g/jour) obtenue à partir d'une synthèse bibliographique (d'après Geraert *et al* 2003).



poids (croissance) permet de calculer la quantité de lysine que le poulet doit ingérer. Pour un niveau d'ingestion connu, cet outil permet donc de formuler un aliment équilibré. Néanmoins, cette synthèse regroupe un ensemble de publications d'origines diverses et mélange des animaux de génotype et d'âge différents et ne prend pas en compte les spécificités de chacun. Le modèle « lysine ingérée en fonction de la vitesse de croissance » suppose que, quel que soit le génotype ou l'âge de l'animal, l'efficacité d'utilisation de la lysine est la même. De plus, il suppose par exemple que des poulets de chair à croissance lente ou à haut rendement en filet à vitesse de croissance égale (mais d'âges différents) ont le même besoin en lysine. Enfin, cette approche nécessite un contrôle optimal du niveau de consommation d'aliment, ce qui est assez délicat en pratique.

1.3 / Les facteurs génétiques

En France, la diversification des modes de production a conduit à l'utilisation de souches caractérisées par des vitesses de croissance plus ou moins élevées. Un poulet label rouge, qui atteint 2 kg en 80 jours, et un poulet dit standard, qui atteint le même poids en 40 jours, ont-ils les mêmes besoins en AAE ?

La détermination du besoin en AAE chez des génotypes de vitesses de croissance différentes ne se pose peut être pas comme une simple comparaison au même âge. Le besoin global étant la résultante des besoins d'entretien et de production, la composition du gain de poids et le nombre de jours de production sont des variables essentielles. Certains travaux montrent que des poulets de chair de vitesses de croissance très différentes peuvent avoir un besoin en lysine (en % de l'aliment) similaire à âge égal (Han et Baker 1991 et 1994). Dans ces expériences, la proportion de protéine dans le gain de poids était similaire entre les génotypes. Donc si la consommation s'ajuste aux besoins en AAE, le besoin exprimé en % par kg d'aliment peut être effectivement le même. Néanmoins, il semble logique de considérer qu'à un gain plus important de protéines corporelles correspond un besoin plus élevé d'AAE à même niveau d'ingestion. Ceci explique que Moran et Bilgili (1990) observent que le besoin en lysine soit supérieur pour des poulets à croissance rapide par rapport à des poulets à croissance plus lente, mais seulement quand le paramètre à optimiser est le rendement en filet, résultats plusieurs fois confirmés sur des souches sélectionnées pour ce paramètre (Tesseraud *et al* 1999, Rosa *et al* 2001a). Cette logique n'est pourtant pas vérifiée pour tous les AAE ; c'est le cas du besoin en tryptophane pour lequel aucune différence significative n'a été mise en évidence entre un génotype à haut rendement en filet et un génotype classique (Rosa *et al* 2001b).

Si une différence de composition en protéines du croît induit une différence de besoin en AAE, une différence de vitesse d'emplacement devrait également induire des modi-

fications des besoins en AA soufrés du fait de la richesse des plumes en ces AA. Dans deux publications récentes concernant des poulets à emplumement lent et rapide, aucune différence de besoin en méthionine n'est mesurée entre les deux souches entre 0 et 6 semaines d'âge. Néanmoins, un besoin légèrement supérieur en cystine (0,44 contre 0,39 % entre 0 et 3 semaines et 0,42 contre 0,37 % entre 3 et 6 semaines) est mesuré pour la souche à emplumement rapide (Kalinowski *et al* 2003a et 2003b). Aucune différence significative de besoin en AA soufrés n'a été mesurée entre les lignées cou nu et non cou nu entre 4 et 6 semaines d'âge (Pesti *et al* 1996).

Le dimorphisme sexuel permet également de comprendre l'influence du métabolisme protéique sur le besoin en AAE. La capacité de dépôt protéique est moins élevée chez les femelles que chez les mâles, ce qui peut expliquer que leurs besoins en AAE soient inférieurs (Thomas *et al* 1986 et 1987, Han et Baker 1993). Un besoin en lysine pour le gain de poids plus élevé pour les mâles par rapport aux femelles a été mesuré entre 8 et 22 jours (+9,7%) et entre 22 et 41 jours (+8,9%) (Han et Baker 1991).

1.4 / Les facteurs environnementaux

La sélection sur la vitesse de croissance a sans doute entraîné une hypersensibilité des poulets à toute modification de leur environnement d'élevage. La corrélation négative entre la vitesse de croissance et l'immunité ainsi que la maturation insuffisante du système immunitaire observée chez des poulets à croissance rapide est sans doute une des raisons de cette sensibilité aux pathologies et à l'environnement (Siegel *et al* 1982, Maatman *et al* 1993).

Il existe assez peu de travaux concernant la relation entre besoin en AAE et immunité. Néanmoins, un besoin en thréonine supérieur chez des poulets élevés sur litière usagée par rapport à une litière fraîche a été mesuré entre 42 et 46 jours (Kidd *et al* 2003). Une hypothèse avancée par les auteurs pour expliquer cette différence serait l'activité plus importante du système immunitaire et notamment la synthèse d'immunoglobuline, forte consommatrice d'AAE. Un travail récent (Rama Rao *et al* 2003) va dans le même sens : en inoculant *E.coli* à des poulets nourris avec des régimes de teneur croissante en méthionine entre 43 et 49 jours d'âge, les résultats suggèrent qu'une réponse immunitaire optimale nécessite une quantité plus importante de méthionine que celle nécessaire à l'optimisation de la croissance.

La température ambiante élevée entraîne une réduction sensible de la croissance et notamment de l'ingéré (Han et Baker 1993). La baisse des performances peut alors provenir d'une consommation trop faible d'AAE, ce qui pourrait suggérer que la concentration des AAE dans l'aliment devrait être plus importante. Néanmoins, quel que soit l'âge des poulets ou la courbe de température

appliquée (constante ou cyclique), aucune différence de besoin en AAE n'a été clairement démontrée (Han et Baker 1993, Mendes *et al* 1997, Shan *et al* 2003). Lors de forte chaleur, la baisse globale des dépôts protéiques ne peut être endiguée par une simple augmentation de la teneur de l'aliment en protéine ou en AAE (Temim *et al* 2000b). Même si l'efficacité d'utilisation de certains AAE comme la lysine et la méthionine semble réduite lors de forte chaleur (March et Beily 1972, Knight *et al* 1994), l'explication principale de la réduction relative des besoins en AAE au chaud est une modification du métabolisme protéique. Par exemple, il a été montré que la chaleur induit une réduction de la capacité de protéosynthèse (-20 à -35 % selon le muscle), essentiellement liée à une réduction de la capacité ribosomale (= quantité d'ARN ribosomique/quantité de protéines), alors que la protéolyse est peu affectée (Temim *et al* 2000a). Une étude récente de Zarate *et al* (2003) va dans ce sens en montrant que surélever la teneur d'un régime commercial en AAE de 10 % pour un même taux protéique n'entraîne pas d'amélioration des dépôts protéiques en période de forte chaleur. Les auteurs observent néanmoins une légère amélioration des performances zootechniques, mais qui tient essentiellement à un engraissement plus élevé des poulets (Zarate *et al* 2003).

1.5 / Bilan des sources de variation

La variabilité de l'estimation des besoins en AAE du poulet de chair provient pour une grande part des méthodologies expérimentales et d'analyse statistique des résultats. La variabilité propre des besoins en AAE selon le génotype ou les conditions d'élevage est plus difficile à appréhender, sauf dans des situations très contrastées (potentiel de croissance pectorale, mâle/femelle, chaleur). Les effets des facteurs environnementaux sont multiples et peuvent aussi bien toucher plusieurs paramètres du métabolisme que le comportement alimentaire de l'animal, ce qui rend vraiment difficile la détermination d'un besoin. Il n'y a donc pas un besoin universel, mais plutôt un ensemble de réponses qui doivent conduire à des recommandations adaptées aux conditions de production. Les situations d'élevage sont complexes car multifactorielles et la création d'un outil de modélisation pouvant intégrer un ensemble de facteurs de variation peut constituer une approche complémentaire à l'expérimentation classique pour aider un professionnel à quantifier l'impact de conditions données sur une recommandation alimentaire.

2 / Approche mécaniste du besoin en AAE

Les véritables besoins en AAE résultent d'interactions complexes de nombreux facteurs qui, même lorsqu'elles sont connues, ne sont pas quantifiées avec précision. Ce que les nutritionnistes chevronnés appellent

Les besoins du poulet varient selon son génotype et les conditions de son élevage, ce qui conduit à préconiser des apports alimentaires adaptés aux différentes situations plutôt que de déterminer un besoin théorique.

« l'expérience », ne permet d'appréhender que quelques fluctuations nutritionnelles ou environnementales en même temps. Le poulet, comme tout système biologique, est un système complexe, c'est-à-dire que nous sommes encore loin de la connaissance exhaustive de son fonctionnement. Les outils informatiques actuels permettent la construction d'outils de simulation qui peuvent prendre en compte simultanément un ensemble important de facteurs. Un modèle est dit empirique lorsqu'il décrit les relations entre les éléments seulement par des ajustements (régressions), et mécaniste lorsqu'il utilise des relations liées à la connaissance que l'on a du système et de son fonctionnement (Zoons *et al* 1991).

La modélisation permet de prendre en compte simultanément de nombreux facteurs de variation et leurs interactions et d'intégrer les connaissances que l'on a du fonctionnement biologique.

La modélisation mécaniste des besoins en AAE considère généralement que l'accrétion protéique constitue la force motrice de la croissance. Pour cela, il est généralement nécessaire de connaître la composition corporelle, plus particulièrement celle du compartiment protéique, et le découpage théorique en besoins pour l'entretien et pour la croissance (Hurwitz *et al* 1980, Emmans 1981, Hruby *et al* 1994). Pour formuler un aliment, l'ingéré doit être connu avec précision. Aux outils de prédiction des besoins en AAE sont le plus souvent couplés des prédicteurs de l'ingestion. Initialement, les outils de modélisation étaient conçus pour simuler la réponse animale, mais rapidement leur objectif est devenu plus pratique, orienté vers l'optimisation des pratiques alimentaires et d'élevage (Frost *et al* 2003).

2.1 / Modèles de calcul des besoins et d'optimisation de la croissance des poulets

a / Modèle d'Hurwitz

L'un des plus anciens modèles mécanistes de calcul des besoins en AAE est celui d'Hurwitz *et al* (1978). Les besoins en AAE sont définis en fonction de la croissance des compartiments protéiques. Le besoin protéique est décomposé en « entretien » (Leveille *et al* 1960), « croissance corporelle » et « croissance des plumes », ces dernières pouvant représenter jusqu'à 20 % des protéines totales du poulet (Edwards *et al* 1973). A partir d'une courbe de croissance définie (un objectif) et connaissant la composition en AAE de chacun des compartiments protéiques (entretien, carcasse et plumes), le système calcule les gains en protéines (corporelles et plumes) ainsi que les besoins quotidiens en AAE (tableau 3). Complété par la prédiction de l'ingestion via les besoins énergétiques de l'animal et le couplage à un logiciel de programmation linéaire, le modèle commercial CHICKOPT™ a été mis au point en 1994 comme outil d'optimisation économique de l'aliment (Talpez *et al* 1986 et 1988). En 1996, sur les bases du modèle d'Hurwitz, Novus commercialise OMNIPRO II™ (Oviedo-Rondon *et al* 2002) qui intègre les effets de nombreux facteurs d'élevage : sexe, température, densité animale, restriction alimentaire.

b / Modèle d'Emmans, Gous et Fisher

Le modèle FORTEL™ est développé au Scottish Agricultural collège d'Edinburgh (Emmans 1981, Emmans et Fisher 1986). Les objectifs de cet outil sont comparables au précédent. Son fonctionnement repose sur la description de la croissance d'un animal dans des conditions idéales, assurant l'expression de son plein potentiel génétique. La croissance réalisée par l'animal est définie par la somme des constituants chimiques qui la composent (eau, protéine, lipides, minéraux). Le compartiment protéique est mesuré expérimentalement, sa croissance est décrite par une équation de Gompertz. Les autres composantes corporelles sont calculées à partir du compartiment protéique par allométrie (Hancock *et al* 1995, Gous *et al* 1999). Les besoins énergétiques sont calculés à partir de la croissance potentielle via un système énergétique original qui prend en compte la production de chaleur associée à l'excrétion (urine et matière organique) et à la rétention de protéines et de lipides (Emmans 1994). La méthode de détermination des besoins en AAE est comparable à celle développée par Hurwitz (Emmans et Fisher 1986). Seuls les coefficients de digestibilité des AA diffèrent entre les deux modèles : 0,75 contre 0,85 pour tous les AA dans le modèle d'Hurwitz (Hruby *et al* 1994).

Une version plus récente de l'outil est commercialisée sous le nom d'EFG software™. Elle inclut un modèle de la croissance couplé à un logiciel de formulation ainsi qu'un outil déterminant l'optimum en AAE et énergie du régime dans diverses conditions d'élevage (température, densité animale) et pour divers génotypes (Gous et Fisher 2001). Le modèle EFG va plus loin que les précédents quant à la notion de consommation d'aliment. En effet, si le calcul de l'ingéré potentiel quotidien dérive des besoins énergétiques en situation optimale (DFI = *desired feed intake*), l'ingéré réalisé, en cas de situation non optimale (CFI = *constrained feed intake*) dépend également du facteur limitant primaire : l'environnement d'élevage, les para-

Tableau 3. Méthode de calcul des besoins en AAE d'après Hurwitz (1978).

Le besoin d'entretien en un acide aminé essentiel (AARm) est défini comme une fonction du poids vif et de la proportion de cet AA dans la « protéine d'entretien » (AAm) :
$\text{AARm (g/jour)} = \text{AAm} \times 2,316 \times (\text{Poids vif})^{2/3}$
Le besoin en cet AA pour la croissance (AAG) est calculé en fonction du gain en protéine de la carcasse (C) et des plumes (F) :
$\text{AAG (g/jour)} = (\text{C} \times \text{AAc} + \text{F} \times \text{AAf}) / 0,85$
(avec AAc : proportion de l'acide aminé dans la carcasse ; AAf : proportion de l'acide aminé dans les plumes)
Le besoin total en acide aminé :
$\text{AARt} = \text{AAG} + \text{AARm}$

mètres physiques ou nutritionnels de l'aliment (Emmans et Kyriazakis 2001). D'après Emmans, deux paramètres vont particulièrement pouvoir modifier l'ingéré : la capacité à perdre de la chaleur et la capacité d'encombrement de l'aliment. Le calcul de l'ingéré *ad libitum* est assuré par l'algorithme suivant :

Définition 1 : $DFI = RQ1/FC1$

Définition 2 : $CFI = CAP1/FCON1$

Algorithme : Si $DFI < CFI$

Alors : Ingéré = DFI

Sinon : Ingéré = CFI

avec $RQ1$ = le besoin pour le limitant primaire (unité/jour), $FC1$ = la quantité du limitant primaire dans l'aliment (unité/kg), $CAP1$ = capacité d'ingestion du premier facteur contraignant (unité/kg), $FCON1$ = apport du premier facteur contraignant dans l'aliment (unité/kg).

c / Modèle de King

Une autre façon d'optimiser les besoins sans les calculer directement est de modéliser l'effet d'un aliment sur la croissance. Le programme BPHL (pour Bromley Park Hatcheries Limited) développé par King (2001) simule la croissance quotidienne des poulets de chair à partir du poids initial, des caractéristiques nutritionnelles de l'aliment et d'un jeu de paramètres (constantes du modèle et constantes de calibration). Le dépôt des AA est défini à partir du facteur limitant primaire par deux constantes : un coefficient d'efficacité de dépôt du facteur limitant primaire, qui augmente avec la quantité ingérée, et le plateau à partir duquel les AA servent à d'autres voies métaboliques que la croissance protéique (King 2001). Selon l'auteur, cette approche est en accord avec les principes biologiques qui sous-tendent les compétitions de transport des AA par les transporteurs de l'épithélium intestinal et des membranes cellulaires. Le modèle simule l'ingestion par une notion d'appétit. Elle dérive de la définition d'unités de réplétion de l'animal (RU : *Repletion Unit*) appliquée à l'aliment (RUGF : *Repletion Unit per Gram of Feed*). La consommation quotidienne de RU est définie par deux polynômes dépendant du poids vif de l'animal (avant et après que le poids vif de l'animal soit de 640 g). L'ingéré est calculé grâce au rapport entre RU et RUGF. L'unité de réplétion liée à l'aliment est définie par :

$$RUGF = 2 \times EM \text{ (kcal/g)} + (1,62 \times 5,7339 \text{ (kcal/g de protéine)} \times \text{Teneur en protéine (\%/100)}) \times Q \text{ (constante de calibration, par défaut = 1)}$$

Elle est une représentation de la concentration énergétique de l'aliment qui introduit l'influence de la teneur en protéine totale de l'aliment. Les coefficients 2 pour l'EM et 1,62 pour les protéines sont arbitraires et ont pour seule fonction de privilégier l'influence de l'EM dans le processus de réplétion. Le modèle a été construit pour des poulets de chair à croissance rapide (Shaver) et nécessite la calibration de nombreuses constantes. Le modèle n'intègre pas les effets des conditions d'élevage et a été construit pour des conditions dites standard.

d / Modèle de Leclercq et Beaumont

Récemment, Leclercq et Beaumont (2001) ont proposé un modèle d'optimisation simplifié de la recommandation d'apport en lysine pour le poulet de chair entre 20 et 40 jours. A partir de seulement 4 paramètres : le poids vif initial ($Y1$), le gain de poids ($Y2$), la teneur en lipide du gain ($Y3$) et un paramètre d'efficacité d'utilisation de l'énergie pour l'entretien ($Y4$), ce modèle permet d'estimer les performances (consommation et indice de consommation) et la recommandation d'apport en lysine pour un groupe de poulets. Un fichier comprenant ces 4 paramètres pour 10000 individus a été généré de manière stochastique à partir de données moyennes (\pm écart type) provenant d'une expérience. Le besoin en lysine individuel potentiel est calculé de la façon suivante :

Besoins en lysine (g/kg d'aliment) :

Lysine pour l'entretien : $Lys e = (0,082 \times PV^{0,75} \times 20) / \text{Consommation d'aliment}$

Lysine pour la croissance : $Lys c = (0,086 \times \text{Prot} \times Y2) / \text{Consommation d'aliment}$

($\text{Prot (g/g)} = \text{teneur en protéine du gain} = 0,225 - 0,27 \times Y3$ (d'après Leclercq et al 1994) ; PV = poids moyen entre 20 et 40 jours.

La consommation d'aliment est calculée à partir de la somme des besoins énergétiques rapportés à la teneur en énergie du régime. Les besoins énergétiques pour l'entretien et la croissance sont calculés à partir d'un système d'équations récentes (B. Carré, données non publiées). L'hypothèse principale du modèle pour simuler la réponse individuelle à la teneur en lysine du régime est la proportionnalité de la croissance au rapport entre : la différence entre teneur en lysine du régime (X) et celles en $Lys e$, et la concentration en $Lys c$ ($\text{Croissance} = f((X - Lys e)/Lys c)$). En d'autres termes, les auteurs considèrent que la réponse est la représentation théorique du besoin individuel avec une phase linéaire et un plateau. L'algorithme suivant permet de simuler la vitesse de croissance en fonction de la teneur en lysine de l'aliment :

Si $(Lys e + Lys c) \geq X$

Alors : Gain de poids simulé = $Y2 \times ((X - Lys e)/Lys c)$

Sinon : Gain de poids simulé = $Y2$

Ainsi, même si les concepts qui sous-tendent les modèles rapidement présentés ici se veulent mécanistes, la part d'empirisme est loin d'être négligeable. De plus, le fonctionnement des modèles n'est pas toujours facile d'accès et leur application pratique est rarement testée. Une façon de savoir s'ils sont une bonne représentation de la question posée est leur validation.

2.2 / Validation

La validation est une étape fondamentale qui permet non seulement de connaître le degré de précision d'un modèle, mais aussi de remettre en cause sa structure et ses règles de fonctionnement. Elle n'est pas seulement la dernière pierre que l'on pose à l'édifice de

l'outil, mais un processus qui s'applique à chaque étape de sa construction et doit être un souci constant du modélisateur. Harlow et Ivey (1994) proposent une approche pratique de l'évaluation d'un modèle qui passe par quatre étapes principales :

- la satisfaction des objectifs du modèle : les entrées et sorties correspondent-elles aux objectifs ? Peut-on répondre à la question « qu'est-ce qui se passe si... » avec les éléments que propose le modèle ?

- est-il facile à utiliser ? La calibration du modèle est une étape fondamentale car un modèle est créé à partir d'un jeu restreint de données. Or il doit pouvoir s'adapter à d'autres situations. Certains paramètres du modèle servent à l'ajustement du modèle aux nouvelles conditions, ce sont les paramètres de calibration. Leur modification doit être logique et facilement accessible.

- quelle est sa précision ? Est-il suffisamment proche des données réelles (moyenne et écart type) ?

- y a-t-il un biais ? Le biais est une erreur systématique du modèle causée le plus souvent par une mauvaise estimation de certains paramètres ou bien par un problème de calibration.

D'autres démarches plus rigoureuses et théoriques ont été proposées qui distinguent en général trois étapes successives (Kleijnen 1995, Rykiel 1996) : une vérification du formalisme du modèle, une estimation des paramètres du modèle et une validation proprement dite qui doit s'assurer que la précision des résultats obtenus est suffisante par rapport aux objectifs qui lui sont assignés.

Si l'on s'intéresse au comportement des modèles décrits précédemment, les besoins en AAE, calculés par le modèle d'Hurwitz (Hurwitz *et al* 1978) sont assez comparables à ceux du NRC (1971) à l'exception des besoins en protéine et en lysine, inférieurs de 20 et 30 % respectivement à ceux du NRC. Les régimes formulés à partir des besoins calculés par ce modèle par rapport au NRC (1971) entraînent un ingéré plus élevé (de 5 % en finition) pour une croissance comparable et, par conséquent, une dégradation de l'efficacité alimentaire (de 6 % en finition). Ces mesures semblent confirmer une subcarence en AAE, sans doute en lysine (Hurwitz *et al* 1978 et 1980). Le biais du modèle provient de la sous-estimation de la teneur en lysine de la carcasse qui représente plutôt 9 que 7,5 % des protéines totales (Hurwitz *et al* 1980). Les corrections apportées au modèle ont amélioré les prédictions et conduit à l'intégration des besoins calculés dans la mise à jour des tables du NRC (1994).

L'évaluation du modèle initial de Hurwitz *et al* (1978) suggère donc une sous-estimation des besoins en AAE de l'ordre de 10 à 20 % (Jackson 1987). Une évaluation de sa version commerciale, le modèle CHICKOPT™, a été réalisée à partir de deux jeux de données, l'un expérimental, et l'autre commercial (Harlow et Ivey 1994). L'expérience réalisée présente un schéma factoriel de 4 teneurs énergétiques et de 4 teneurs en protéines pour des mâles et des femelles entre 0 et 21 jours. Les perfor-

mances à 21 jours sont relativement bien décrites par le modèle, même si les erreurs maximales observées sont de -4,6 % sur le poids vif et de 10,3 % pour l'indice de consommation, mais ces erreurs concernent les régimes extrêmes, peu représentatifs des pratiques du terrain. CHICKOPT™ explique 92 % de la variation observée, ce qui en fait un outil de prédiction suffisamment précis pour être utilisable sur le terrain. La validation de la version Novus de CHICKOPT™, OMNIPRO II™, par une comparaison des aliments formulés selon les tables du NRC et le logiciel, suggère une bonne précision de la prédiction de la croissance, mais pas de l'indice de consommation qui semble sous-estimé par le logiciel (Oviedo-Rondón *et al* 2002). Les aliments formulés avec le modèle sont plus riches en protéines et AA que les aliments habituels, donc plus coûteux.

Les travaux de validation publiés sont peu nombreux et semblent démontrer que la prédiction de l'ingéré reste un problème. Les modèles sont validés par leurs concepteurs et souvent dans des conditions proches de celles qui leur ont donné naissance. Pourtant, l'objectif de ces modèles est une utilisation à plus grande échelle et dans des conditions diverses. Pour formuler un aliment ou prédire les performances technico-économiques d'un programme alimentaire, la consommation alimentaire est une mesure-clef, quelles que soient les conditions. Comment expliquer la relative faiblesse des modèles pour prédire l'ingestion ? La majorité des modèles s'appuie sur le principe de l'ajustement de l'ingéré alimentaire de l'animal à ses besoins en énergie. Ceux-ci dérivent selon les modèles de la composition corporelle de l'animal (besoin de production) et de son poids vif (entretien). N'est-il pas surprenant de considérer ainsi que l'animal grossit pour manger et non pas le contraire ? En outre, les concepts biologiques permettant le calcul des besoins sont discutables (Birkett et de Lange 2001). En effet, les besoins d'entretien du poulet en croissance sont mesurés par une relation allométrique avec le poids métabolique, dans des conditions de chambres respiratoires qui permettent mal la prise en compte de l'activité physique des animaux (Tappy *et al* 2003). Le comportement alimentaire d'un animal et ses caractéristiques temporelles et quantitatives d'ingestion nécessitent une analyse plus précise. Le modèle BPHL introduit notamment une notion de capacité d'ingestion et le modèle d'Emmans et Fisher (1986) va plus loin en proposant les notions d'ingéré potentiel et d'ingéré réel. Mais ces méthodes ne permettent pas une simulation précise de l'ingéré (King 2001, Whittemore *et al* 2003), qui est le plus souvent une « sortie facultative » du modèle (Frost *et al* 2003).

2.3 / Les outils mécanistes sont-ils pratiques ?

Le degré d'utilisation des modèles sur le terrain n'est pas précisément connu aujourd'hui. Pourtant ils permettent de simuler des situations complexes plus proches de la réalité

Les limites d'utilisation des différents modèles existant sont leur faible capacité d'évolution et leur adaptation plus ou moins facile à différents systèmes de production.

d'un élevage que l'expérimentation. Ils devraient être a priori adaptés à une utilisation commerciale pour prédire ou simuler des situations d'élevage réelles ou fictives. En outre, en les couplant à des outils économétriques rapportant la performance au bénéfice, l'impact de décisions d'élevage peut être intégré rapidement à un système de production tout entier. Les modèles sont également un moyen de réfléchir au fonctionnement du système, que ce soit un poulet, un élevage ou un système de production, et constituent par leur construction logique un outil pédagogique.

Il est vrai que les concepts biologiques et/ou mathématiques qui se cachent derrière les modèles sont assez difficiles à appréhender pour un utilisateur qui n'a pas une solide formation théorique en nutrition. De plus, le caractère commercial des modèles ne permet pas toujours aux auteurs d'exprimer en détails les hypothèses de fonctionnement du système dans les publications. Les outils actuels sont bien souvent des « boîtes noires » : trop rigides et peu évolutives car pas assez accessibles à l'utilisateur. Dans le cas du modèle d'Emmans (1981), les paramètres ajustables sont : le profil de température d'élevage et, ce qui est moins facile à connaître pour un utilisateur, les coefficients des courbes de Gompertz décrivant la croissance des animaux (Gous *et al* 1999). Le modèle CHICKOPT™ est moins contraignant car il nécessite de simples relevés hebdomadaires de poids vif et calcule lui-même les coefficients de la courbe de Gompertz (Harlow et Ivey 1994). Comment être certain que les équations qui composent le modèle seront valables demain et sinon comment les faire évoluer ? A l'inverse, lorsque le modèle est totalement ouvert à l'utilisateur, son ajustement peut s'avérer difficile. Par exemple, le BPHL (King 2001) comprend 10 paramètres principaux de calibration et 5 constantes auxiliaires qui rendent ses capacités d'ajustement importantes, mais nécessitent une bonne compréhension des théories du modèle (Suntariporn Duan-yai 1999).

Enfin, les outils de simulation sont le plus souvent construits pour l'élevage des poulets de chair à croissance rapide dans des conditions standard bien contrôlées. Or, en France, les modes de production alternatifs utilisent aussi des poulets à croissance lente dans des conditions plus extensives (accès à un parcours, à plusieurs aliments différents...), des poulets à croissance intermédiaire (productions certifiées) ou des souches lourdes destinées à la découpe essentiellement. Les courbes de croissance, la composition corporelle et les capacités d'adaptation de ces animaux sont assez mal connues et que dire de leur besoin en AAE ? Les modèles actuels ne permettent pas de simuler les réponses de ces animaux dont les contraintes de production sont différentes des conditions standard. Une adaptation des modèles EFG et BPHL à une production sub-tropicale thaïlandaise a d'ailleurs montré les limites de ces outils lorsqu'ils sont utilisés dans des conditions éloignées de celles qui leur ont donné naissance (Suntariporn Duan-yai 1999).

3 / Vers un outil pratique de simulation de la croissance : INAVI ?

Un outil de simulation de la croissance des poulets de chair a été développé à la Station de recherches avicoles de l'INRA (Nouzilly) en collaboration avec l'Institut technique de l'aviculture (ITAVI) et un groupe d'industriels de l'alimentation animale. INAVI (contraction de INRA et ITAVI) se veut un outil permettant de simuler la croissance en fonction de paramètres nutritionnels et environnementaux. L'objectif est de concevoir un outil simplifié, utilisable dans la pratique et adaptable à un grand nombre de situations d'élevage, comme par exemple un poulet label rouge sur parcours ou un poulet standard en conditions optimales.

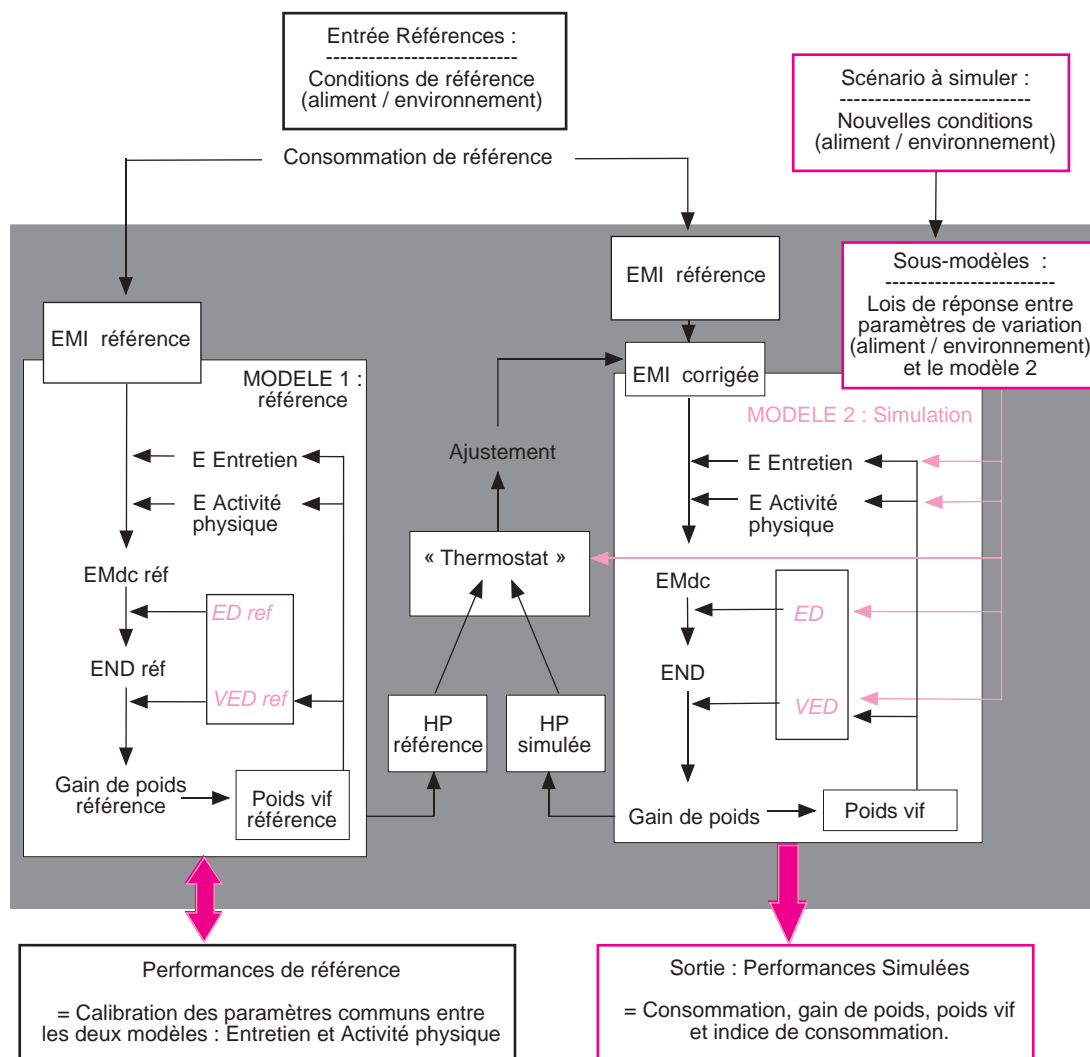
Le modèle est déterministe et dynamique. Il simule la croissance d'un poulet moyen sur un pas de temps horaire afin de permettre l'utilisation de programmes lumineux quotidiens ou de cycles de température. INAVI est basé sur une représentation conceptuelle du fonctionnement du poulet. Cette approche mécaniste a pour but l'obtention d'un modèle le plus universel et adaptable possible. L'objectif d'INAVI n'est pas spécifiquement la détermination des besoins en acides aminés. Toutefois il intègre l'effet des apports en AAE et en protéines de l'aliment sur la croissance et l'efficacité alimentaire des poulets de chair (sorties du modèle), ce qui permet de simuler les conséquences de variations d'apport d'AAE sur les performances. L'intégration d'autres facteurs de variations essentiels de la croissance (entrées du modèle) comme la granulométrie de l'aliment, sa teneur en énergie métabolisable, le rythme lumineux et de nombreux paramètres d'environnement (température, hygrométrie, vitesse de l'air, densité animale ...), permet de resituer l'impact d'une teneur en AAE dans le contexte spécifique d'une production et d'en analyser les conséquences en tenant compte de plusieurs caractéristiques d'élevage.

3.1 / Architecture et fonctionnement d'INAVI

Les modèles actuels utilisent la composition corporelle et les besoins énergétiques pour prédire l'ingestion. Définir l'ingestion comme la conséquence de la composition corporelle et des besoins énergétiques n'est pas satisfaisant (King 2001). C'est pour cette raison qu'INAVI a été construit pour simuler les modifications de l'ingéré dans une situation donnée (un scénario) à partir d'une situation connue (un objectif, une référence) (figure 3). INAVI nécessite donc deux types d'entrées pour son fonctionnement : une référence et des conditions de simulation.

La référence est définie par l'utilisateur. Elle correspond à des données réelles moyennes, à un objectif de croissance dans des conditions optimales ou encore à l'objectif d'un groupement d'éleveurs dans des

Figure 3. Schéma simplifié du fonctionnement d'INAVI. INAVI comprend deux modèles (1 : référence et 2 : simulation) permettant l'ajustement des performances simulées par rapport à la référence en fonction du scénario de simulation et de ses effets sur le modèle de simulation. L'effet des nouvelles conditions opère via les sous-modèles. L'ajustement de la consommation de référence est assuré par la boucle de rétroaction du thermostat sur la consommation énergétique corrigée. Paramètres : voir figure 4.



Le modèle INAVI est construit pour lever ces limites. Il permet de prédire les performances du poulet à partir des données de l'utilisateur qui peut aussi adapter le fonctionnement du modèle à sa propre expérience.

conditions définies (aliment, température, programme lumineux, etc.). Seule la courbe d'ingéré de référence sert de donnée d'entrée aux simulations. Les performances de référence (poids vif, indice de consommation, etc.) servent pour la calibration du modèle de référence (ajustement initial du modèle de référence aux données de l'utilisateur). Cette calibration permet de déterminer pour le jeu de données de référence, deux coefficients IE (indice de besoin d'entretien) et FA (évolution de l'activité physique de l'animal en fonction de l'âge) qui sont ensuite fixés pour les simulations.

Les conditions de simulation sont les paramètres qui vont être modifiés par l'utilisateur lors de la simulation. INAVI intègre les effets de la teneur en énergie du régime, de la présentation physique de l'aliment, de sa teneur en protéine, du niveau de l'AA limitant primaire, des conditions d'environnement (température, humidité ...). La modification des conditions (nutrition, environnement d'élevage) entraîne la variation des paramètres du modèle de simulation en fonction des lois de

réponse entre le facteur nutritionnel ou environnemental et le paramètre considéré. Ces lois de réponse sont regroupées dans des sous-modèles, totalement accessibles à l'utilisateur.

3.2 / Modèle énergétique simplifié

La base du système est la modélisation de l'utilisation de l'énergie métabolisable ingérée (EMI) (figure 4). Le modèle calcule l'énergie disponible pour la croissance (EMdc), c'est-à-dire la quantité d'énergie restante quand les besoins pour l'entretien (E Entretien) et pour l'activité physique (E Activité Physique) sont retranchés à l'EMI. L'activité physique peut représenter de 7 à 15 % de l'EMI chez le poulet de chair (Wen et Van Es 1980). La quantification du coût énergétique de l'activité physique par calorimétrie directe ou indirecte est lourde et peu transposable à ce qui se passe effectivement dans un poulailler. La modélisation permet justement d'en tenir compte et de rechercher à quantifier les évo-

Figure 4. Architecture de base du modèle énergétique d'INAVI.

Paramètres calculés du modèle :

E Act Physique = Coût énergétique de l'activité physique (kcal/jour)

E Entretien = Coût énergétique de l'entretien (hors activité physique, kcal/jour)

EMI = Energie Métabolisable Ingérée (kcal/jour)

EMdc : Energie Métabolisable disponible pour la croissance (kcal/jour)

END = Energie nette déposée (kcal/jour)

HP = Production de chaleur (g/kg de poids vif)

Paramètres fixés :

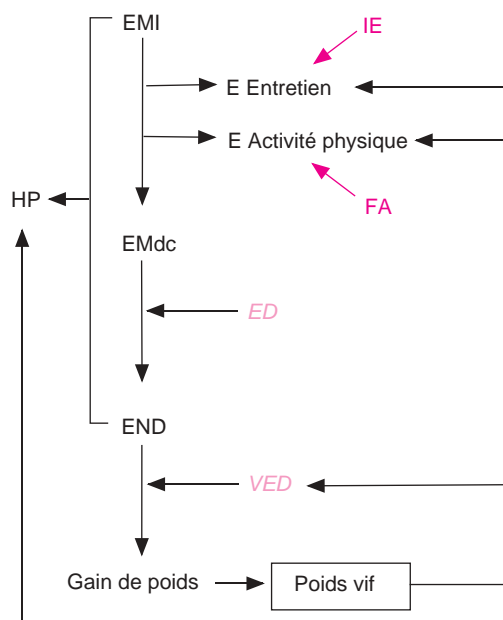
ED = Efficacité du Dépôt de l'EMdc en EN (coefficient)

VED = Valeur Énergétique du Dépôt (kcal/g de gain de poids)

Paramètres de calibration :

FA = Facteur âge sur l'activité physique

IE = Indice d'Entretien



lutions du niveau d'activité physique en fonction de l'âge ou de la qualité de l'aliment, notamment sa présentation physique (Savory 1974). Enfin, simuler l'activité physique est utile pour représenter des modes d'élevage aussi différents que le poulet standard en claustration et le poulet label sur parcours.

Dans le modèle, l'activité physique est définie par deux composantes :

Niveau d'activité Physique (NAP) = Activité initiale (%) - FA*(Age - Age initial)

Energie de l'Activité Physique = Niveau d'activité * (UA * Poids Vif)

Avec : FA = Facteur Age (% par jour) et UA = Unité d'Activité (kcal / g de poids vif . NAP)

Le niveau d'activité physique, composante comportementale du simulateur, est défini par l'activité initiale au début de la simulation, cette activité étant évaluée par la proportion du temps que le poulet passe debout (mesure par scan sampling ; Picard et Faure 1997). Le niveau d'activité décroît avec l'âge selon une relation linéaire dont la pente est le facteur âge (FA). La traduction en énergie du

niveau d'activité est une fonction du poids vif d'une unité d'activité (UA), c'est-à-dire une estimation du coût énergétique d'un point de niveau d'activité. D'après Wenk et Van Es (1980), l'activité physique représente environ 10 % de l'EMI chez un poulet à croissance rapide (entre 20 et 40 jours d'âge) dans des conditions optimales, c'est pourquoi la valeur de l'UA est fixée à 1,5 kcal/g de poids vif.

L'efficacité d'utilisation de l'énergie pour le dépôt des protéines et des lipides est définie dans la plupart des modèles publiés, mais l'estimation de leurs coefficients d'utilisation peut varier de 0,6 à 0,8 pour les lipides et de 0,4 à 0,6 pour les protéines (Birkett et de Lange 2001). INAVI n'utilise qu'un seul coefficient d'efficacité moyen du dépôt (ED), fixé à 0,6 dans des conditions optimales. Ce choix pratique - et discutable - est basé sur le fait que la sélection génétique a homogénéisé la composition corporelle des poulets. De plus, la variation de composition des dépôts de lipides et de protéines pendant la période économiquement importante (20 à 40 jours) chez un poulet à croissance rapide est modérée. Le coefficient ED permet le calcul de l'énergie nette déposée (END), transformée en gain de poids grâce à l'estimation de la valeur énergétique du dépôt (VED), c'est-à-dire le coût d'un gramme de gain de poids. La VED est une fonction du poids vif de l'animal, calculée à partir des données de composition corporelle de poulets à croissance rapide mesurées par Gous *et al* (1999).

Si l'EMI est la force motrice du modèle, l'ED, la VED, l'indice d'entretien (IE) et le FA contrôlent le bilan énergétique, donc la croissance. Le modèle énergétique simplifié permet de simuler l'utilisation de l'énergie ingérée. Il est l'élément de base du système dont l'objectif majeur est la prédiction de l'EMI dans des conditions variables.

L'ajustement de l'ingestion de référence est basé sur le principe de l'homéostasie thermique, c'est-à-dire le maintien d'une température corporelle constante. L'idée de base du modèle est que la courbe d'ingestion en situation de référence représente l'équilibre thermique de l'animal. Le sous-modèle appelé thermostat compare la production de chaleur simulée à celle de référence à chaque pas de temps. En cas de différence, le modèle détermine la modification de l'ingestion nécessaire pour revenir à l'équilibre thermique. Toutefois, la capacité d'ingestion d'un poulet de chair, c'est-à-dire la quantité d'aliment ingérée par pas de temps, n'étant pas infinie, l'ingestion est bornée par une valeur maximale.

La première version d'INAVI est disponible auprès de l'INRA ou de l'ITAVI (s'adresser aux auteurs). Le modèle nécessite encore une validation externe plus poussée par des données expérimentales et de terrain. Une validation interne permettra de définir les paramètres les plus influents pour consolider la structure et rendre le modèle moins sensible à des erreurs de paramétrage. L'architecture et la construction d'INAVI permettent de le faire évoluer en ajoutant par exemple de nouveaux facteurs de variation

de la réponse et en modifiant les paramètres. L'utilisateur peut donc l'adapter à ses propres préoccupations, à ses propres choix conceptuels et à ses propres données.

Conclusion

L'analyse des expérimentations traitant des besoins en AAE ou de la construction des tables de besoins montre que les sources de variation du besoin, qu'elles soient liées aux conditions expérimentales ou aux modèles d'interprétation statistique, rendent problématique la transposition d'un résultat de recherche au terrain. Par rapport aux outils classiques de détermination du besoin, les outils mécanistes, même s'ils ne sont pas encore plus efficaces, permettent de rendre compte de la complexité d'un système « poulet » (ou même d'un système de production tout entier) et de gérer les interactions multiples qui le constituent. De plus, ils ont l'immense intérêt de ne plus considérer une norme comme un dogme que la rigidité rend fragile.

L'utilisation réelle d'un modèle dans un outil de terrain passe par un juste équilibre entre la complexité qu'il tente de représenter et son accessibilité à l'utilisateur. A son évaluation classique, c'est-à-dire la réponse à la question posée, la précision, le biais et la facilité d'utilisation, il faudrait ajouter la flexibilité, par exemple l'adaptabilité à l'ensemble des types de production, et l'évolutivité, c'est-à-dire la capacité de l'outil à être mis à jour.

L'idée, non pas d'un modèle mathématique de type régression, mais plutôt d'un outil logique, pouvant être implémenté et modifié par l'utilisateur est un moyen de s'adapter aux situations de demain, tout en permettant à l'utilisateur d'améliorer sa compréhension du système. Finalement, un modèle peut être vu comme une synthèse cohérente d'hypothèses et de résultats expérimentaux qui pourront évoluer avec le temps et l'avancée des travaux de recherche. De tels modèles permettront sans doute de mieux évaluer les besoins en AAE des poulets de chair en reliant leur détermination à l'environnement et à l'évolution des génotypes et des pratiques d'élevage.

Références

- Baker D.H., Han Y., 1994. Ideal amino acid profile for broiler chicks during the first three weeks posthatching. *Poult. Sci.*, 73, 1441-1447.
- Baker D.H., Batal A.B., Parr T.M., Augspurger N.R., Parsons C.M., 2002. Ideal ratio (relative to lysine) of tryptophan, threonine, isoleucine, and valine for chicks during the second and third weeks posthatch. *Poult. Sci.*, 81, 485-494.
- Berndtson W.E., 1991. A simple, rapid and reliable method for selecting or assessing the number of replicates for animal experiments. *J. Anim. Sci.*, 69, 67-76.
- Birkett S., de Lange K., 2001. Limitations of conventional models and a conceptual framework for a nutrient flow representation of energy utilization by animals. *Br. J. Nutr.*, 86, 647-659.
- Bregendahl K., Sell J.L., Zimmerman D.R., 2002. Effect of low-protein diets on growth performance and body composition of broiler chicks. *Poult. Sci.*, 81, 1156-1167.
- Corzo A., Moran E.T.Jr., Hoehler D., 2002. Lysine need of heavy broiler males applying the ideal protein concept. *Poult. Sci.*, 81, 1863-1868.
- D'Mello J.P.F., 2003. Responses of growing poultry to amino acids. In: *Amino Acids in Animal Nutrition 2nd*, 114-119, CAB International, United Kingdom.
- Edwards H.M., Dennen F., Abou-Ashour A., Nugara D., 1973. Carcass composition studies: I. Influences of age and type of dietary fat supplementation on total carcass and fatty acid composition. *Poult. Sci.*, 52, 363-369.
- Emmans G., 1981. A model of the growth and feed intake of ad libitum fed animals, particularly poultry. In: *Computer in Animal production (Occasional publication No.5, British Society of Animal Production)*, 103-110, Edinburgh, Scotland.
- Emmans G., 1994. Effective : a concept of energy utilization applied across species. *Br. J. Nutr.*, 71, 801-821.
- Emmans G.C., Fischer C., 1986. Problem in nutritional theory. In: *Nutrient Requirement of Poultry and Nutritional Research*, 9-39, Butterworths, London, United Kingdom.
- Emmans G.C., Kiyiazakis I., 2001. Nutrition and Behaviour group Symposium on 'Future Perspectives in Nutrition and Behaviour Research', Consequences of genetic change in farm animals on food intake and feeding behaviour. *Proc. Nut. Soc.* 60, 115-125.
- Fisher C., Morris T.R., Jennings R.C., 1973. A model for the description and prediction of the response of laying hens to amino acid intake. *Br. Poult. Sci.*, 14, 469-484.
- Frost A.R., Parsons D.J., Stacey K.F., Robertson A.P., Welch S.K., Filmer D., Fothergill A., 2003. Progress towards the development of an integrated management system for broiler chicken production. *Comp. Electr. Agri.*, 39, 227-240.
- Geraert P.A., Mansury E., Jacob S., Dalibard P., 2003. Vers une nouvelle approche des besoins en acides aminés des volaille ? In : 5^{èmes} journées de la recherche avicole, 161-164. ITAVI, Paris, France.
- Grisoni M.L., Uzu G., Larbier M., Geraert P.A., 1991. Effect of dietary lysine level on lipogenesis in broilers. *Reprod. Nutr. Dev.*, 31, 683-690.
- Gous R.M., Fisher C., 2001. Optimising commercial broiler feeding programmes. In: *13th European Symposium on Poultry Nutrition*, 246-247, Blankenberge, Belgique.
- Gous R.M., Morris T.R., 1985. Evaluation of a diet dilution technique for measuring the response of broiler chickens to increasing concentrations of lysine. *Br. Poult. Sci.*, 26, 147-161.
- Gous R.M., Moran E.T.Jr., Stilborn H.R., Bradford G.D., Emmans G.C., 1999. Evaluation of the parameters needed to describe the overall growth, the chemical growth, and the growth of feathers and breast muscles of broilers. *Poult. Sci.*, 78, 812-821.
- Han Y.M., Baker D.H., 1991. Lysine requirements of fast- and slow-growing broiler chicks. *Poult. Sci.*, 70, 2108-2114.
- Han Y., Baker D.H., 1993. Effects of sex, heat stress, body weight, and genetic strain on the dietary lysine requirement of broiler chicks. *Poult. Sci.*, 72, 701-708.
- Han Y., Baker D.H., 1994. Digestible lysine requirement of male and female broiler chicks during the period three to six weeks posthatching. *Poult. Sci.*, 73, 1739-1745.
- Hancock C.E., Bradford G.D., Emmans G.C., Gous R.M., 1995. The evaluation of the growth parameters of six strains of commercial broiler chickens. *Br. Poult. Sci.*, 36, 247-264.
- Harlow H.B., Ivey F.J., 1994. Accuracy, precision, and commercial benefits of growth modelling for broilers. *J. Appl. Poult. Res.*, 3, 391-402.

- Holsheimer J.P., Janssen W.M., 1991. Limiting amino acids in low protein maize-soybean meal diets fed to broiler chicks from 3 to 7 weeks of age. *Br. Poult. Sci.*, 32, 151-158.
- Hruby M., Hamre M.L., Coon C.N., 1994. Growth modelling as a tool for predicting amino acid requirements of broilers. *J. Appl. Poult. Res.*, 3, 403-415.
- Hurwitz S., Sklan D., Bartov I., 1978. New formal approaches to the determination of energy and amino acid requirements of chicks. *Poult. Sci.*, 57, 197-205.
- Hurwitz S., Plavnik I., Bartov I., Bornstein S., 1980. The amino acid requirements of chicks: experimental validation of model- calculated requirements. *Poult. Sci.*, 59, 2470-2479.
- Hurwitz S., Sklan D., Talpaz H., Plavnik I., 1998. The effect of dietary protein level on the lysine and arginine requirements of growing chickens. *Poult. Sci.*, 77, 689-696.
- INRA, 1984. L'alimentation des animaux monogastriques : porc, lapin, volailles. INRA, Paris, France.
- Jackson M.E., 1987. The development of computer models to estimate nutrient requirement of broiler chicken. PhD Dissertation. University of Arkansas. Fayetteville, AR, USA.
- Kalinowski A., Moran E.T.Jr., Wyatt C.L., 2003a. Methionine and cystine requirements of slow- and fast-feathering male broilers from zero to three weeks of age. *Poult. Sci.*, 82, 1423-1427.
- Kalinowski A., Moran E.T.Jr., Wyatt C.L., 2003b. Methionine and cystine requirements of slow- and fast-feathering broiler males from three to six weeks of age. *Poult. Sci.*, 82, 1428-1437.
- Kerr B.J., Kidd M.T., Halpin K.M., McWard G.W., Quarles C.L., 1999a. Lysine level increase live performance and breast meat yield in male broiler. *J. App. Poult. Res.*, 8, 381-390.
- Kerr B.J., Kidd M.T., McWard G.W., Quarles C.L. 1999b. Interactive effects of lysine and threonine on live performance and breast meat yield in male broiler. *J. App. Poult. Res.*, 8, 391-399.
- Kidd M.T., Fancher B.I., 2001. Lysine needs of starting chicks and subsequent effects during the growing period. *J. App. Poult. Res.*, 10, 385-393.
- Kidd M.T., Barber S.J., Virden W.S., Dosier III W.A., Chamblee D.W., Wiernuz C., 2003. Threonine response of Cobb male finishing broiler in differing environmental conditions. *J. App. Poult. Res.*, 12, 115-123.
- King R.D., 2001. Description of a growth simulation model for predicting the effect of diet on broiler composition and growth. *Poult. Sci.*, 80, 245-253.
- Kleijnen J.P.C., 1995. Theory and Methodology. Verification and validation of simulation models. *Eur. J. Operat. Res.*, 82, 145-162.
- Knight C.D., Wuelling C.W., Atwell C.A., Dibner J.J., 1994. Effect of intermittent periods of high environmental temperature on broiler performance responses to sources of methionine activity. *Poult. Sci.*, 73, 627-639.
- Knowles T., Southern L., 1998. The lysine requirement and ratio of total sulfur amino acids to lysine for chicks fed adequate or inadequate lysine. *Poult. Sci.*, 77, 564-569.
- Labadan M.C.Jr., Hsu K.N., Austic R.E., 2001. Lysine and arginine requirements of broiler chickens at two- to three-week intervals to eight weeks of age. *Poult. Sci.*, 80, 599-606.
- Lamberson W.R., Firman J.D., 2002. A comparison of quadratic versus segmented regression procedures for estimating nutrient requirements. *Poult. Sci.*, 81, 481-484.
- Leclercq B., 1998. Lysine: Specific effects of lysine on broiler production: comparison with threonine and valine. *Poult. Sci.*, 77, 118-123.
- Leclercq B., Beaumont C., 2001. Effects of genetic potential on the lysine requirement and economic results of simulated broiler flocks. *Anim. Res.*, 50, 67-78.
- Leclercq B., Tesseraud T., 1993. Possibilités de réduction des rejets azotés en aviculture. *INRA Prod. Anim.*, 6, 225-236.
- Leveille G.A., Shapiro R., Fisher H., 1960. Amino acid requirements for maintenance in the adult rooster. IV. The requirement for methionine, cystine, phenylalanine, tyrosine and tryptophan; the adequacy of the determined requirements. *J. Nutr.*, 72, 8-15.
- Maatman R., Gross W.B., Dunnington E.A., Larsen A.S., Siegel P.B., 1993. Growth, immune response and behaviour of broiler Leghorn cockerels fed different methionine levels. *Arch. Geflügelk.*, 57, 249-256.
- Mack S., Bercovici D., De Groote G., Leclercq B., Lippens M., Pack M., Schutte J.B., Van Cauwenberghe S., 1999. Ideal amino acid profile and dietary lysine specification for broiler chickens of 20 to 40 days of age. *Br. Poult. Sci.*, 40, 257-265.
- March B.E., Beily J., 1972. The effect of energy supplied from the diet and from environment heat on the response of chicks to different levels of dietary lysine. *Poult. Sci.*, 51, 665-668.
- Mendes A.A., Watkins S.E., England J.A., Saleh E.A., Waldroup A.L., Waldroup P.W., 1997. Influence of dietary lysine levels and arginine:lysine ratios on performance of broilers exposed to heat or cold stress during the period of three to six weeks of age. *Poult. Sci.*, 76, 472-481.
- Moran E.T., Bilgili S.F., 1990. Processing losses, carcass quality, and meat yields of broiler chickens receiving diets marginally deficient to adequate in lysine prior to marketing. *Poult. Sci.*, 69, 702-710.
- NRC (National Research Council), 1971. Nutrient Requirement of Poultry. 6th ed, National Academy of Sciences, National Research Council, Washington, D.C., USA.
- NRC (National Research Council), 1994. Nutrient Requirement of Poultry. 9th rev, National Academic Press, Washington, D.C., USA.
- Oviedo-Rondón E.O., Fritts C.A., Waldroup P.W., 2002. Accuracy of Omnipro II™ estimations for amino acids requirements of broilers. *Int. J. Poult. Sci.*, 1, 119-126.
- Pack M.R., 1997. Factors impacting amino acid levels recommended for growing poultry. In: 11th European symposium on Poultry nutrition, 104-165, Faaborg, Denmark.
- Pesti G.M., Miller B.R., 1997. Modelling for Precision Nutrition. *J. Appl. Poult. Res.*, 6, 483-494.
- Pesti G.M., Leclercq B., Chagneau A.M., Cochard T., 1996. Effects of the naked neck (Na) gene on the sulfur-containing amino acid requirements of broilers. *Poult. Sci.*, 75, 375-380.
- Picard M., Faure J.M., 1997. Comportement : scan ou focal faut-il choisir ? Journées de la Recherche Avicole, 2, 213-216.
- Picard M., Plouzeau M., Faure J.M., 1999. A behavioural approach to feeding broilers. *Ann. Zootech.*, 48, 233-245.
- Rama Rao S.V., Praharaj N.K., Ramasubba Reddy V., Pandan A.K., 2003. Interaction between genotype and dietary concentrations of methionine for immune function in commercial broilers. *Br. Poult. Sci.*, 44, 104-12.
- Remmenga M.D., Milliken G.A., Kratzer D., Schwenke J.R., Rolka H.R., 1997. Estimating the maximum effective dose in a quantitative dose-response experiment. *J. Anim. Sci.*, 75, 2174-2183.
- Rosa A.P., Pesti G.M., Edwards H.M.Jr., Bakalli R., 2001a. Threonine requirements of different broiler genotypes. *Poult. Sci.*, 80, 1710-1717.
- Rosa A.P., Pesti G.M., Edwards H.M.Jr., Bakalli R. 2001b. Tryptophan requirements of different broiler genotypes. *Poult. Sci.*, 80, 1718-1722.
- Roth F.X., Gruber K., Kirchgebner M., 2001. The ideal dietary amino acid pattern for broiler chicks of age 7 to 28 days. *Arch. Geflügelk.*, 65, 199-206.
- RPAN (Rhône Poulenc Animal Nutrition), 1993. Rhodimet Nutrition guide 2nd ed. Rhône Poulenc Animal Nutrition, Antony, France.

- Rykiel E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecol. Model.*, 90, 229-244.
- Savory C.J., 1974. Growth and behaviour of chicks fed on pellet or mash. *Br. Poult. Sci.*, 15, 281-286.
- Schutte J., Smink W., 1998. Requirement for apparent faecal digestible lysine of broiler chicks in the starting, growing and finishing phase. *Arch. Geflügelk.*, 62, 254-259.
- Sève B., 1994. Alimentation du porc en croissance : intégration des concepts de protéine idéale, de disponibilité digestive des acides aminés et d'énergie nette. INRA. *Prod. Anim.*, 7, 275-291.
- Shan A.S., Sterling K.G., Pesti G.M., Bakalli R.I., Driver J.P., Tejedor A.A., 2003. The influence of temperature on the threonine and tryptophan requirements of young broiler chicks. *Poult. Sci.*, 82, 1154-1162.
- Si J., Fritts C.A., Burnham D.J., Waldroup P.W., 2001. Relationship of dietary lysine level to the concentration of all essential amino acids in broiler diets. *Poult. Sci.*, 80, 1472-1479.
- Siegel P.B., Gross W.B., Cherry J.A., 1982. Correlated responses of chickens to selection for production of antibodies to sheep erythrocytes. *Anim. Blood Groups Biochem. Genet.*, 13, 291-297.
- Suntariporn Duan Yai, 1999. Analysis of computer simulation models for the thai broiler industry. PhD Dissertation. University of Queensland, New Zealand.
- Talpaz H., De la Torre J., Sharpe J., Hurwitz S., 1986. Dynamic optimisation model for feeding of broilers. *Agri. Syst.*, 20, 121-132.
- Talpaz H., Hurwitz S., De la Torre J.R., Sharpe J., 1988. Economic optimisation of a growth trajectory for broilers. *Amer. J. Agr. Econ.*, 382-390.
- Tappy L., Binnert C., Schneiter Ph., 2003. Energy expenditure, physical activity and body weight control. *Proc. Nutr. Soc.*, 62, 663-666.
- Temim S., Chagneau A.M., Peresson R., Tesseraud S., 2000a. Chronic heat exposure alters protein turnover of three different skeletal muscles in finishing broiler chickens fed 20 or 25% protein diets. *J. Nutr.*, 130, 813-819.
- Temim S., Chagneau A.M., Guillaumin S., Michel J., Peresson R., Tesseraud S., 2000b. Does excess dietary protein improve growth performance and carcass characteristics in heat-exposed chickens? *Poult. Sci.*, 79, 312-317.
- Tesseraud S., Le Bihan-Duval E., Peresson R., Michel J., Chagneau A.M., 1999. Response of chick lines selected on carcass quality to dietary lysine supply: live performance and muscle development. *Poult. Sci.*, 78, 80-84.
- Thomas O.P., Farran M., Tamplin C.B., Zuckerman A.I., 1987. Broiler starter studies: I. The threonine requirements of male and female broiler chicks. In : *Proceedings of the Maryland Nutrition Conference*, 38-42. College Park, MD, USA.
- Thomas O.P., Zuckerman A.I., Farran M., Tamplin C.B., 1986. Updated amino acid requirements of broiler. In : *Proceedings of the Maryland Nutrition Conference*, 79-85. College Park, MD, USA.
- Vasquez M., Pesti G.M., 1997. Estimation of the lysine requirement of broiler chicks for maximum body gain and feed efficiency. *J. App. Poult. Res.*, 6, 241-246.
- Wenk C., Van Es A.J., 1980. Studies on the energy metabolism and the protein and fat deposition of growing chickens with special reference to physical activity. *Z. Tierphysiol. Tierernähr. Futtermittelkd.*, 43, 241-254.
- Whittemore E.C., Emmans G.C., Kyriazakis I., 2003. The problem of predicting food intake during the period of adaptation to a new food: a model. *Br. J. Nutr.*, 89, 383-398.
- Zarate A.J., Moran E.T.Jr, Burnham D.J., 2003. Exceeding essential amino acid requirements and improving their balance as a mean to minimize heat stress in broilers. *J. App. Poult. Res.*, 12, 37-44.
- Zoons J., Buyse J., Decuyere E., 1991. Mathematical models in broiler raising. *World Poult. Sci. J.*, 47, 243-255.

Abstract

What "requirements" for essential amino acids in broiler chickens? A critical survey of their determination and of some practical models

To balance the feed levels in essential amino acids, nutritionists use tables containing average requirements stemming from bibliographical surveys. Result of experiments studying essential amino acid requirements, depend both on the criterion to be optimized (growth rate or feed efficiency) and on the methodology adopted for analysing the results. From an experiment to the other, environmental conditions and chicken genotype may also explain a part of the observed variability of the requirements. To cope with this variability, the results from numerous experiments obtained mainly in fast growing broilers raised under optimal conditions are pooled but the results of those grouped analyses are not precise, and this impairs the application of measured amino acid requirements to field conditions. Mechanistic models integrating basic knowledge of the energy and protein metabolism might constitute additional tools to quantify the effects of an

essential amino acid level on broiler performances under different conditions. Models not only synthesise the knowledge acquired by various experiments but also take simultaneously into account the multiple interactions among factors of variation. There are some marketed models measuring the effects of the main feed characteristics (essential amino acids, energy etc.) and raising conditions on chicken growth. Their results seem precise enough for an application but they are presented as "black boxes" and the complexities of their functioning make them difficult to update. INAVI is a model fully open to the user that might be more adapted to the diversity of production systems. Prediction of the growth of the chicken by INAVI is based on the effects of environmental and nutritional factors on feed intake regulation.

QUENTIN M., BOUVAREL I., BASTIANELLI D., PICARD M., 2004. Quels « besoins » du poulet de chair en acides aminés essentiels ? Une analyse critique de leur détermination et de quelques outils pratiques de modélisation. *INRA Prod. Anim.*, 17, 19-34.